Prueba Final de Electrónica Avanzada 1
10/12/2020

Resolver cada problema en hojas separadas.
Duración de la prueba: 3 horas.
La prueba es **sin** material.
Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

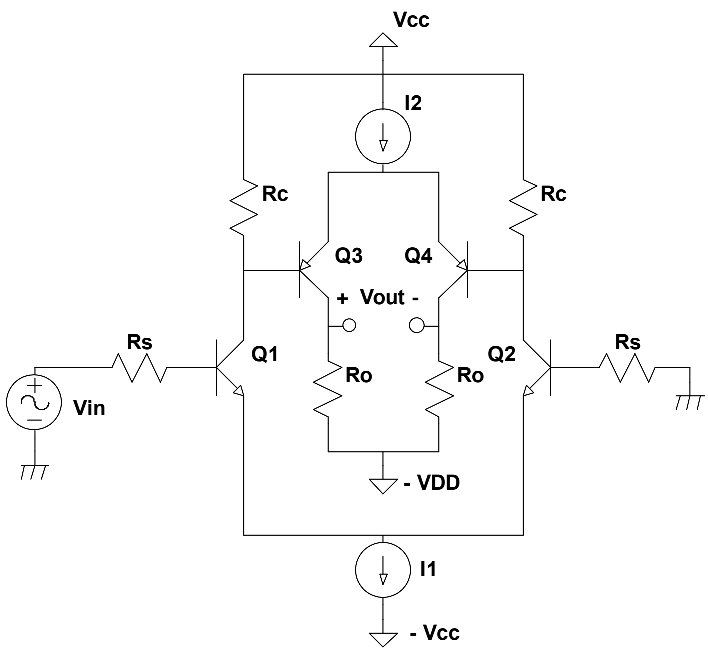
Problema 1 (36 ptos):

En el circuito de la figura, Vcc y -Vcc son tales que todos los transistores trabajan en zona activa. Determine:

a) Ganancia a frecuencias medias.
b) Frecuencia de corte superior.

Datos:

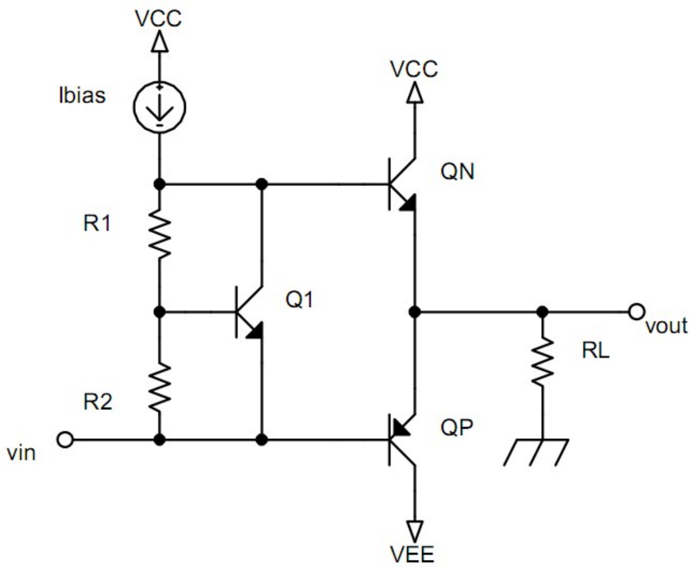
Rs = 100 Ω, Ro = 1 kΩ, Rc = 5 kΩ, I1 = I2 = 1 mA.
Todos los transistores tienen $\beta = 100$, $V_A = \infty$, $C_\mu = 1$ pF, $C_{je} = 20$ pF y $f_{T@IC=1mA} = 100$ MHz



Problema 2 (36 ptos):

Para el circuito de la figura:

a) Determine R2 y el mínimo Ibias que aseguren poder suministrar 4 W de potencia a la carga y una tensión de 1.5 V entre las bases de QN y QP.
b) Determine la eficiencia de la etapa de salida cuando se suministran 4 W a la carga.
c) Determine la máxima potencia que deben disipar los transistores QN y QP para cualquier potencia entregada entre 0 W y 4 W.
d) Determine la máxima temperatura ambiente a la que puede funcionar el circuito.
e) A cada transistor QN y QP se le coloca un disipador capaz de disipar 4 mW/°C por cada cm2 de superficie. El disipador se supondrá acoplado a través de una resistencia térmica θcs = 0.5°C/W. ¿Qué superficie debe tener cada disipador para que el circuito pueda funcionar a una temperatura ambiente máxima de 40°C?



Datos:

VCC = -VEE = 10 V
RL = 8 Ω
R1 = 180 Ω
Q1: VBE = 0.6 V si Ic > 5 mA; β >> 1
QN, QP: VBE = 0.75 V; $\beta_{N,P} = 50$; $T_{jmáx} = 100$ °C; $\theta_{jc} = 2$ °C/W; $\theta_{ca} = 70$ °C/W

Problema 3 (28 ptos):

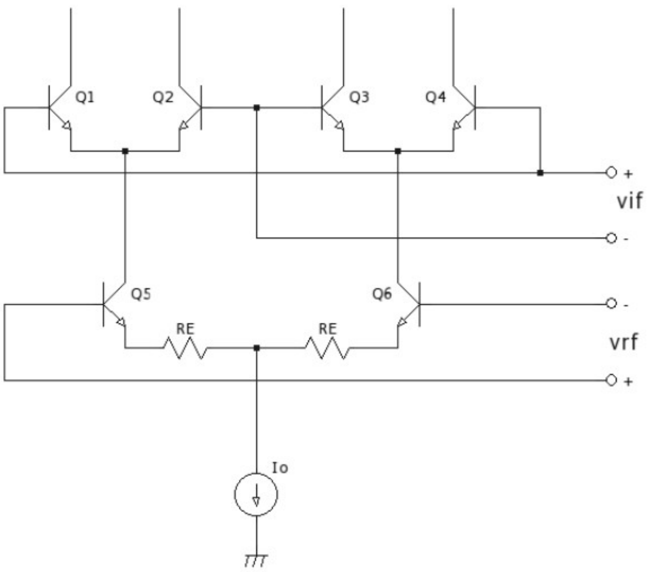
En el circuito de la Figura 1 se muestra un circuito multiplicador de cuatro cuadrantes. A los efectos de simplificar el esquemático no se dibujó el circuito de polarización. Se podrá suponer que la polarización es tal que los transistores trabajan en zona activa y que $gm_{5,6}.R_E >> 1$.

a) Indique la forma en que se deben conectar los colectores de los transistores Q1 a Q4 para que el circuito cumpla la función deseada. Justifique.

b) Hallar la función que vincula vo1 con vs.

c) Si se conecta la salida vo1 del circuito de la Figura 2 a la entrada vif del multiplicador de la parte a), hallar la función que vincula vout con vs y vrf. La tensión VB es una tensión DC de polarización que se podrá suponer tal que los transistores trabajan en zona activa y que $gm_{7,8}.R_e >> 1$.

Dato: Todos los transistores se podrán suponer idénticos.



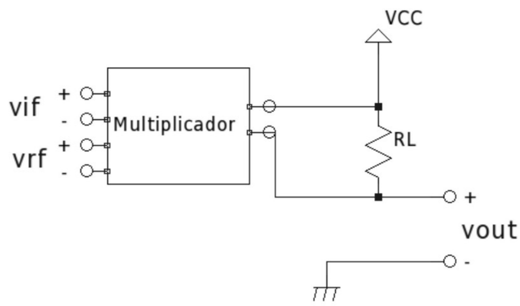


Figura 1

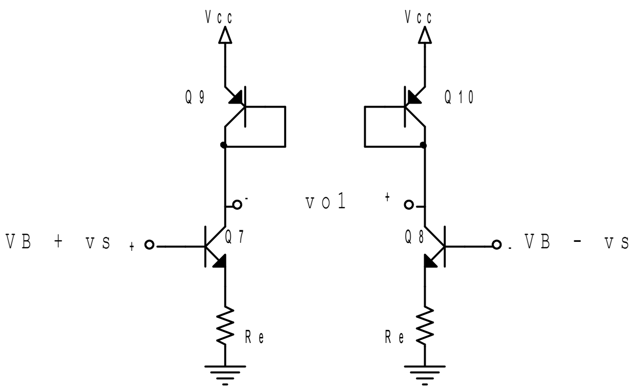


Figura 2

Problema 1

i)

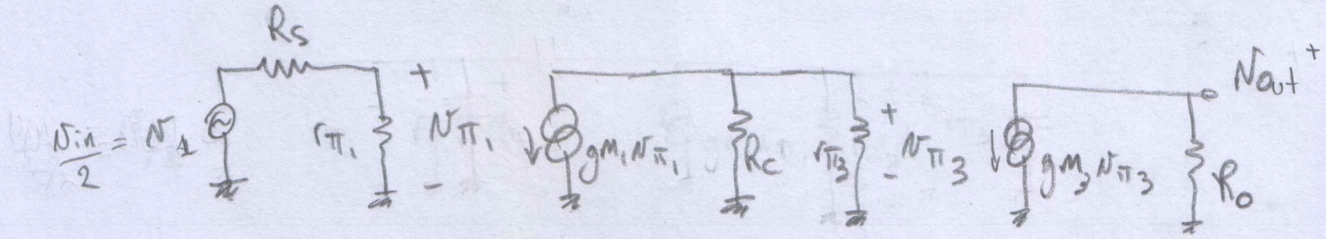
$$I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_{C4} = 0{,}5\,mA$$

$$g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_{m4} = \frac{0{,}5\,mA}{26\,mV} = 0{,}02\ \Omega^{-1}$$

$$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = r_{\pi 3} = r_{\pi 4} = \frac{\beta}{g_m} = 5\,k\Omega$$

Fuentes ideales $\Rightarrow A_c = 0 \Rightarrow$ El circuito responde solo a señal diferencial. $\Rightarrow$ Analizo medio circuito.

A frecuencias medias:



$$\frac{v_{out}^+}{v_1} = \frac{v_{\pi 1}}{v_1} \cdot \frac{v_{\pi 3}}{v_{\pi 1}} \cdot \frac{v_{out}^+}{v_{\pi 3}}$$

$$G_1 = \frac{v_{\pi 1}}{v_1} = \frac{r_{\pi 1}}{r_{\pi 1} + R_S} = 0{,}98$$

$$G_2 = \frac{v_{\pi 3}}{v_{\pi 1}} = -g_{m1}(R_C \| r_{\pi 3}) = -50$$

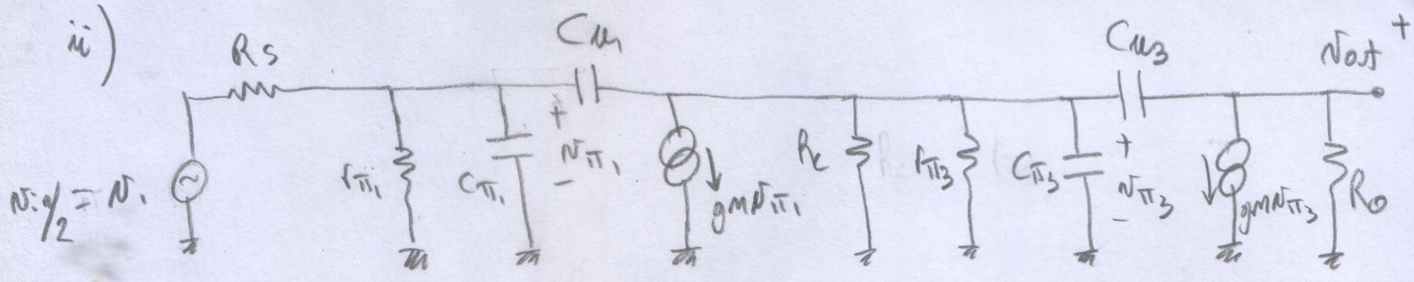
$$G_3 = \frac{v_{out}^+}{v_{\pi 3}} = -g_{m3} R_o = -20$$

$$\Rightarrow \frac{v_{out}^+}{v_1} = 980 \Rightarrow \frac{v_{out}^+}{v_{in}} = 490$$

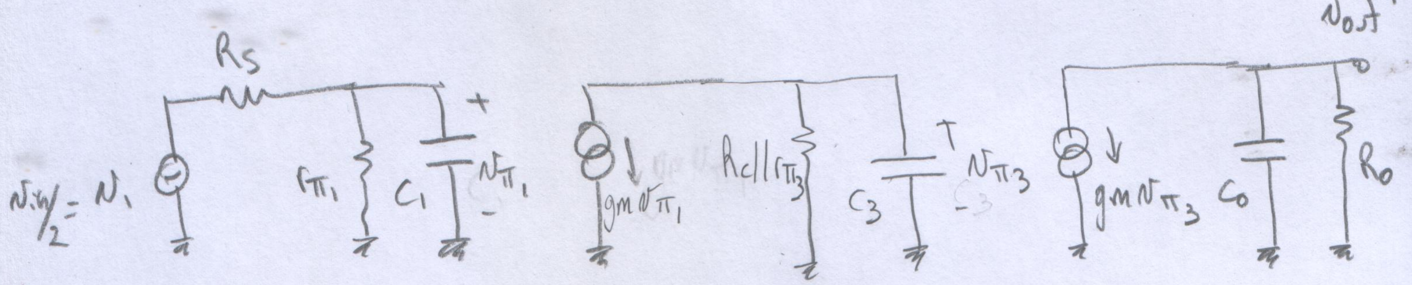
idem $\frac{v_{out}^-}{v_2}$ con $v_2 = -v_{in}/2 \Rightarrow \frac{v_{out}^-}{v_{in}} = -490$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{v_{out}^+ - v_{out}^-}{v_{in}} = \boxed{980}$$

ii)



Bajando $C_{\mu 1}$ y $C_{\mu 3}$ por Miller.



$$C_1 = C_{\pi 1} + C_{\mu 1}(1 - G_2) = C_{\pi 1} + 51\, C_{\mu 1}$$

$$C_3 = C_{\pi 3} + \underbrace{\frac{G_2 - 1}{G_2}}_{\approx 1} \cdot C_{\mu 1} + (1 - G_3) C_{\mu 3}$$

$$C_o = \underbrace{\frac{G_3 - 1}{G_3}}_{\approx 1} \cdot C_{\mu 3}$$

$$C_{\pi @ 1mA} = \frac{g_m @ 1mA}{2\pi\, f_{T @ 1mA}} - C_\mu = 60\,pF = K \cdot I + C_{je}$$

$$\Rightarrow K = \frac{60\,pF - C_{je}}{I} = \frac{60\,pF - 20\,pF}{1\,mA} = 40\,pF/mA$$

$$\Rightarrow C_\pi @_{0,5mA} = 40\,pF/mA \cdot 0{,}5\,mA + 20\,pF = 40\,pF$$

$C_1 = 40\,pF + 1\,pF \cdot 51 = 91\,pF$

$C_3 = 40\,pF + 1\,pF + 21 \cdot 1\,pF = 62\,pF$

$C_o = 1\,pF.$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi\, R_s /\!/ r_{\pi 1} \cdot C_1} = 17{,}84\ MHz$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi\, (R_c /\!/ r_{\pi 3})\, C_3} = \boxed{1\ MHz} \qquad f_{-3db}$$

$$f_{p3} = \frac{1}{2\pi\, R_o\, C_o} = 159\ MHz$$

2 Problema de Amplificadores de Potencia

a) Desprecio la corriente por la base de Q1 con respecto a la corriente por R1 y R2 :

texto

$$I_{R1} = I_{R2} \Rightarrow \frac{V_{BB} - V_{BE1}}{R_1} = \frac{V_{BE1}}{R_2} \Rightarrow R_2 = R_1\left(\frac{V_{BE1}}{V_{BB} - V_{BE1}}\right) = \boxed{120\ \Omega}$$

Además, $I_{R1} = I_{R2} = 5\ mA$

I_{bias} debe ser capaz de entregar corriente suficiente para mantener prendido el transistor Q_1 ($I_{C1} > 5\ mA$) y alimentar la carga R_L a través de la base del transistor Q_N.

$$I_{bias} = I_{R1} + I_{C1} + I_{BN} > I_{R1} + (5\ mA) + I_{BN}$$

El caso más restrictivo se da para un pico positivo de corriente.

$$P_L = \frac{R_L \hat{I}_o^2}{2} \Rightarrow \hat{I}_o = \sqrt{\frac{2P_L}{R_L}} = \sqrt{\frac{2(4W)}{(8\Omega)}} = 1\ A$$

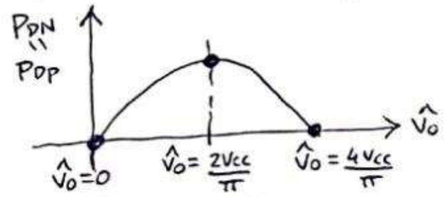
$$\Rightarrow I_{bias} > \underbrace{I_{R1}}_{5mA} + (5\ mA) + \frac{(1A)}{\beta_N + 1} = \boxed{29{,}6\ mA}$$

b) $P_L = 4\ W \Rightarrow \hat{V}_o = R_L \hat{I}_o = 8\ V$

Del teórico para un clase B : $P_{DN} = P_{DP} = \frac{\hat{V}_o}{R_L}\left(\frac{V_{CC}}{\pi} - \frac{\hat{V}_o}{4}\right)$

$$\eta = \frac{P_L}{P_L + \frac{2\hat{V}_o}{R_L}\left(\frac{V_{CC}}{\pi} - \frac{\hat{V}_o}{4}\right)} = \frac{4\ W}{4W + 2{,}366\ W} = \boxed{62{,}8\ \%}$$

c) Del teórico para un clase B: $P_{DN} = P_{DP} = \frac{\hat{V}_o}{R_L}\left(\frac{V_{CC}}{\pi} - \frac{\hat{V}_o}{4}\right)$

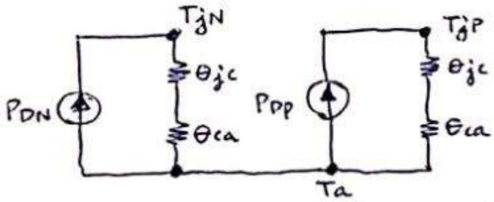


P_{DN} y P_{DP} son máximas para $\hat{V}_o = \frac{2V_{CC}}{\pi}$

(y es un valor permitido porque $\frac{2V_{CC}}{\pi} < 8\ V$)

$$P_{DN}^{máx} = P_{DP}^{máx} = \frac{2V_{CC}}{\pi R_L}\left(\frac{V_{CC}}{\pi} - \frac{V_{CC}}{2\pi}\right) = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = \frac{(10V)^2}{\pi^2(8\Omega)} = \boxed{1{,}27\ W}$$

d)



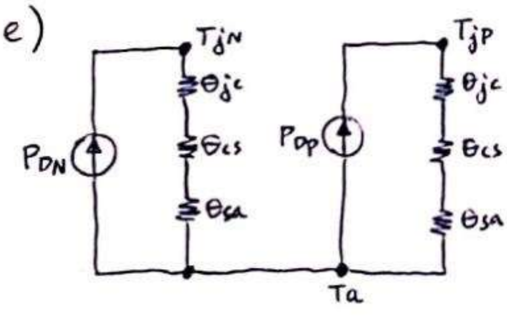
$T_{jN} = T_a + (\theta_{jc} + \theta_{ca})P_{DN} < T_{jmáx}$

$T_a < T_{jmáx} - (\theta_{jc} + \theta_{ca})P_{DN}$

Caso más restrictivo : $P_{DN} = P_{DN}^{máx}$ (de parte c)

$$\Rightarrow T_a < T_{jmáx} - (\theta_{jc} + \theta_{ca})P_{DN,P}^{máx} = (100°C) - (72°C/W)(1{,}27\ W) = \boxed{8{,}56\ °C}$$

e)



$T_a + (\theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa})P_{DN,P}^{máx} < T_{jmáx}$

$$\theta_{sa} < \frac{T_{jmáx} - T_a}{P_{DN,P}^{máx}} - \theta_{jc} - \theta_{cs}$$

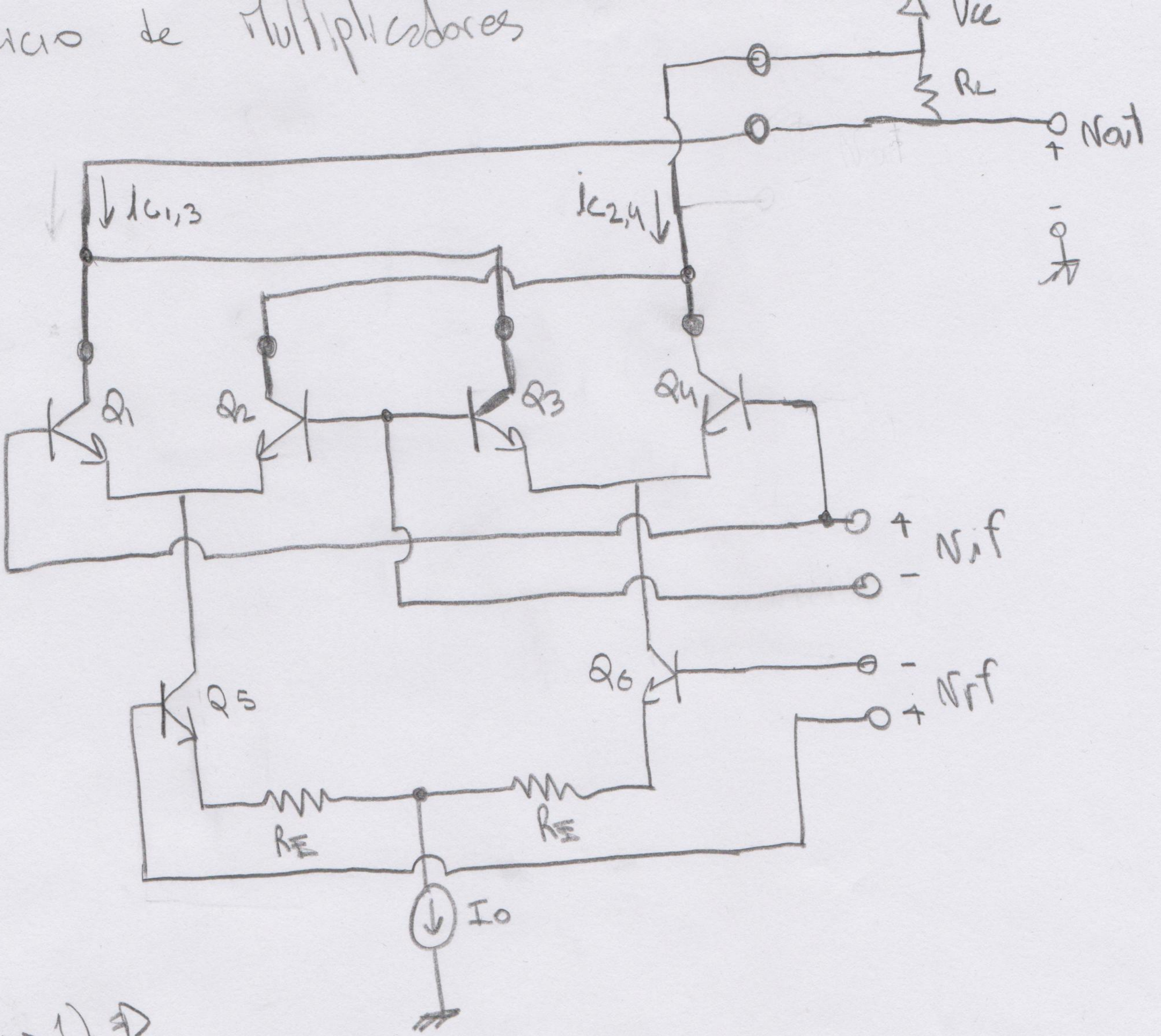
$$\theta_{sa} = \frac{1}{(4\ mW/°C/cm^2)\,S}$$

$$\boxed{5{,}59\ cm^2}$$

$$\Rightarrow S > \frac{1}{(4\ mW/°C/cm^2)\left(\frac{T_{jmáx} - T_a}{P_{DN,P}^{máx}} - \theta_{jc} - \theta_{cs}\right)}$$ //

Ejercicio de Multiplicadores

a)



$(g_{m5,6} R_E \gg 1) \Rightarrow$

$$\Rightarrow i_{CQ5} = \frac{I_o}{2} + \frac{V_{rf}}{2R_E} \quad y \quad i_{CQ6} = \frac{I_o}{2} - \frac{V_{rf}}{2R_E}$$

$$i_{CQ1} = \frac{i_{CQ5}}{2} + g_{m1} \cdot \frac{V_{if}}{2} = \frac{i_{CQ5}}{2}\left(1 + \frac{V_{if}}{2V_T}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{CQ1} = \frac{1}{2}\left(\frac{I_o}{2} + \frac{V_{rf}}{2R_E}\right)\left(1 + \frac{V_{if}}{2V_T}\right)$$

Análogamente:

$$i_{CQ2} = \frac{1}{2}\left(\frac{I_o}{2} + \frac{V_{rf}}{2R_E}\right)\left(1 - \frac{V_{if}}{2V_T}\right)$$

$$i_{CQ3} = \frac{1}{2}\left(\frac{I_o}{2} - \frac{V_{rf}}{2R_E}\right)\left(1 - \frac{V_{if}}{2V_T}\right)$$

$$i_{CQ4} = \frac{1}{2}\left(\frac{I_o}{2} - \frac{V_{rf}}{2R_E}\right)\left(1 + \frac{V_{if}}{2V_T}\right)$$

a) continuación

Al sumar i_{CQ1} con i_{CQ3} logro eliminar los terminos que solo dependen de una de las entradas. Lo mismo ocurre al sumar i_{CQ2} con i_{CQ4}.

$$i_{C1,3} = i_{C1} + i_{C3} = \frac{I_o}{2} + \frac{v_{rf} . v_{if}}{4R_E . V_T}$$

$$i_{C2,4} = i_{C2} + i_{C4} = \frac{I_o}{2} - \frac{v_{rf} . v_{if}}{4R_E . V_T}$$

De esta forma la señal en v_{out} solo depende de la multiplicacion de v_{rf} y v_{if}.

b)

$$v_{o1} = (V_{cc} - v_{eb,Q10}) - (V_{cc} - v_{eb,Q9})$$

$$= \left[V_{cc} - V_T Ln\left(\frac{i_{CQ10}}{I_S}\right)\right] - \left[V_{cc} - V_T Ln\left(\frac{i_{CQ9}}{I_S}\right)\right] = V_T . Ln\left(\frac{i_{CQ9}}{i_{CQ10}}\right)$$

$$= V_T . Ln\left(\frac{i_{CQ7}}{i_{CQ8}}\right) \longrightarrow$$

$$i_{CQ7} = I_1 + \underbrace{\frac{g_{m7}}{1+g_{m7} . R_e}}_{\simeq 1/R_e} v_S \quad ; \quad I_1 = \frac{V_B - V_{BEon}}{R_e} \rightarrow \Rightarrow$$

$$i_{CQ8} = I_1 - \frac{1}{R_e} v_S \longrightarrow$$

$$\Rightarrow v_{o1} = V_T Ln\left(\frac{I_1 + 1/R_e \, v_S}{I_1 - 1/R_e \, v_S}\right) = V_T \underbrace{Ln\left(\frac{1 + \frac{1}{R_e I_1} v_S}{1 - \frac{1}{R_e I_1} v_S}\right)}_{2 \tanh^{-1}(\ldots)} =$$

b) continuación

$$v_{o1} = 2V_T \tanh^{-1}\left(\frac{v_s}{R_e I_1}\right) \quad ; \quad \text{donde } I_1 = \frac{V_B - V_{BEon}}{R_e}$$

c)

Ahora resolvemos i_{CQ1}, i_{CQ2}, i_{CQ3}, e i_{CQ4} sin la aproximación lineal hecha en a).

$$\left.\begin{array}{l} i_{CQ1} = I_s e^{V_{BEQ1}/V_T} \\ i_{CQ2} = I_s e^{V_{BEQ2}/V_T} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{i_{CQ1}}{i_{CQ2}} = e^{\frac{(V_{BEQ1} - V_{BEQ2})}{V_T}} \quad (V_{BEQ1} - V_{BEQ2}) = v_{if}$$

$$i_{CQ1} + i_{CQ2} = i_{CQ5} = \frac{I_o}{2} + \frac{v_{rf}}{2R_E}$$

$$\Rightarrow i_{CQ2} e^{v_{if}/V_T} + i_{CQ2} = \frac{I_o}{2} + \frac{v_{rf}}{2R_E} \Rightarrow$$

$$i_{CQ2} = \frac{\frac{I_o}{2} + \frac{v_{rf}}{2R_E}}{1 + e^{v_{if}/V_T}}$$

Análogamente:

$$i_{CQ1} = \frac{\frac{I_o}{2} + \frac{v_{rf}}{2R_E}}{1 + e^{-v_{if}/V_T}}$$

$$i_{CQ3} = \frac{\frac{I_o}{2} - \frac{v_{rf}}{2R_E}}{1 + e^{v_{if}/V_T}}$$

$$i_{CQ4} = \frac{\frac{I_o}{2} - \frac{v_{rf}}{2R_E}}{1 + e^{-v_{if}/V_T}}$$

c) Continuación

$$v_{out} = V_{CC} - R_L\left(i_{CQ1} + i_{CQ3}\right)$$

$$v_{out} = V_{CC} - R_L\left[\frac{\dfrac{I_0}{2} + \dfrac{v_{rf}}{2R_E}}{\left(e^{v_{if}/2V_T} + e^{-v_{if}/2V_T}\right)e^{-v_{if}/2V_T}} + \frac{\dfrac{I_0}{2} - \dfrac{v_{rf}}{2R_E}}{\left(e^{v_{if}/2V_T} + e^{-v_{if}/2V_T}\right)e^{v_{if}/2V_T}}\right]$$

$$v_{out} = V_{CC} - R_L\left[\frac{I_0}{2}\cancel{\frac{\left(e^{v_{if}/2V_T} + e^{-v_{if}/2V_T}\right)}{\left(e^{v_{if}/2V_T} + e^{-v_{if}/2V_T}\right)}} + \frac{v_{rf}}{2R_E}\cdot\underbrace{\frac{\left(e^{v_{if}/2V_T} - e^{-v_{if}/2V_T}\right)}{\left(e^{v_{if}/2V_T} + e^{-v_{if}/2V_T}\right)}}_{\tanh\left(\frac{v_{if}}{2V_T}\right)}\right]$$

$$v_{out} = V_{CC} - R_L\left[\frac{I_0}{2} + \frac{v_{rf}}{2R_E}\cdot\tanh\left(\frac{v_{if}}{2V_T}\right)\right]$$

sustituyendo v_{if} por v_{o1} (así se conecta por letra)

$$v_{out} = V_{CC} - R_L\left[\frac{I_0}{2} + \frac{v_{rf}}{2R_E}\cdot\tanh\left(\frac{\cancel{2V_T}\cdot\tanh^{-1}\left(\frac{v_s}{R_e I_1}\right)}{\cancel{2V_T}}\right)\right]$$

$$v_{out} = V_{CC} - R_L\left[\frac{I_0}{2} + \frac{v_{rf}}{2R_E}\cdot\frac{v_s}{R_e I_1}\right]$$

PP